

軟X線磁気旋光分光法の確立と磁性多層膜研究への 応用

著者	齊藤 勝彦
号	3081
発行年	2003
URL	http://hdl.handle.net/10097/8353

氏 名	さいとう かつ ひこ 齊 藤 勝 彦
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 15 年 9 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 応用物理学専攻
学 位 論 文 題 目	軟 X 線磁気旋光分光法の確立と磁性多層膜研究への応用
指 導 教 官	東北大学教授 渡邊 誠
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 渡邊 誠 東北大学教授 島田 寛 東北大学教授 山本 正樹 東北大学助教授 加藤 宏朗

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序論

軟 X 線領域における共鳴磁気光学効果測定は、磁性多層膜や磁性体化合物など複数元素から成る磁性体においてこれまで得ることの出来なかった特定元素の磁化に関する情報を引き出すことができる新しい磁性体研究手段である。現在、円偏光放射光を利用した磁気円二色性 (MCD) 測定が行われている。しかし MCD 測定では、直接測定値に影響する円偏光度の値が曖昧に扱われている、ヘリシティあるいは試料の磁化方向を切り替える二通りの光学測定が同一条件下で行えているか、一般に用いられる全電子収量 (TEY) 法が吸収端をまたぐ領域で正しい吸収スペクトルを与えているかなどの問題がある。一方、偏光解析法を用いたものに磁気旋光測定、すなわち透過型のファラデー回転測定と反射型の磁気カー回転測定がある。この測定は、光の偏光状態を明確にして行うものであり、直線偏光を利用し試料の磁化方向を固定した一通りの条件下で測定できる利点がある。したがってより正確な情報が取得できる方法として期待される。また TEY-MCD 法に比べて、透過型のファラデー回転測定はもちろん反射型の磁気カー回転測定においても探査深度が一桁大きく、表面の酸化や汚染の影響に強く左右されずにバルクからの情報を取得できることが期待できるため、磁性多層膜測定においてより有利であると考えられる。しかし、軟 X 線磁気旋光分光の研究例は非常に少ない。これは、軟 X 線領域で不可欠となる多層膜偏光子の開発を合わせて行わなければならないことが最大の原因と考えられる。現在、軟 X 線磁気旋光分光は多層膜偏光子の設計法を含めてまだ確立された段階にはなく未発展状況にある。本研究の目的は、軟 X 線磁気旋光分光法を磁性体研究手段として確立することおよび磁性多層膜の研究に実際に応用して有用性を示すことである。内容は以下の通りである。軟 X 線磁気旋光分光法の確立では、これまで不明確であった多層膜偏光子の設計指針を明らかにし、これに基づき多層膜偏光子を開発する。また、これまでに用いてきた軟 X 線ファラデー回転分光装置を反射型に発展させて入射角可変型の軟 X 線磁気カー回転分光装置を作製する。そして、3d 遷移金属単層膜のファラデー回転測定と磁気カー回転測定を行い、実験結果の妥当性を検証して軟 X 線磁気光学の新しい手法として軟 X 線磁気旋光分光法を確立する。次いで、軟 X 線磁気旋光分光法を磁性多層膜研究へ応用する。具体的には Co/Pt 多層膜の軟 X 線ファラデー回転分光測定と Co/Cu 多層膜の軟 X 線磁気カー回転分光測定を行い、軟 X 線磁気旋光分光法が磁性多層膜の研究に有用な手段であることを示す。

第 2 章 磁気光学分光の理論

磁気旋光測定では、入射光の偏光状態と磁化した試料からの透過あるいは反射光の偏光状態を測定し、両者の違いから試料の磁気的情報を得る。偏光の表示には、偏光楕円の長軸方位角と楕円率で表す楕円

表示を用いる。本章では、楕円表示と複素振幅反射・透過率の関係、ファラデー回転と吸収 MCD 間および磁気カー回転と反射 MCD 間で成立する関係、磁気光学分光で成立するクラマース・クローニヒの関係をもとめた。なおこれに関連して付録 A に、物質固有の物理量である誘電率テンソルと磁化の関係および、任意の磁性多層膜の複素振幅反射・透過率を入射角、各層物質の誘電率テンソルと厚さ、積層順序から具体的に記述する方法をその導出も含め詳述した。

第3章 多層膜偏光子

まず多層膜偏光子設計の原点に戻り、これまで不明確であった多層膜偏光子の設計指針を明らかにした。すなわち、高い直線偏光能を得るためには、より吸収の少ない物質対を選択することが第一義的に重要であることを明確にした。この設計指針に基づき、50~90eV領域で利用可能な複数のAl/YB₆およびMo/Si多層膜偏光子をマグネトロンスパッタ法で作製した。積層構造は等周期構造である。小角X線回折測定より、良好な等周期構造を示す多層膜が作製されていることを確認した。UVSOR施設のBL5Bで行った多層膜偏光子の性能評価測定の結果、偏光能および反射率が最も得難い52eV領域用のAl/YB₆多層膜偏光子においてもそれぞれ0.99（直線偏光能）および38%（s偏光反射率）という良好な性能が得られることを確認した。

第4章 軟X線磁気旋光分光測定装置

軟X線磁気旋光分光測定装置として、これまで用いてきた透過型の軟X線ファラデー回転測定装置を反射型に発展させ、入射角可変型の軟X線磁気カー回転測定装置を作製した。概略図を図1に示す。本装置は、入射強度モニター、透過型フィルター、磁気回路、サンプルホルダー、回転検光子ユニット、ゴニオメーターから成り、入射角60~90°での縦カー回転測定と10~30°での極カー回転測定（およびファラデー回転測定）が可能である。回転検光子ユニットは第3章で述べた多層膜偏光子を検光子として搭載する。光源には放射光（UVSOR施設）を利用する。

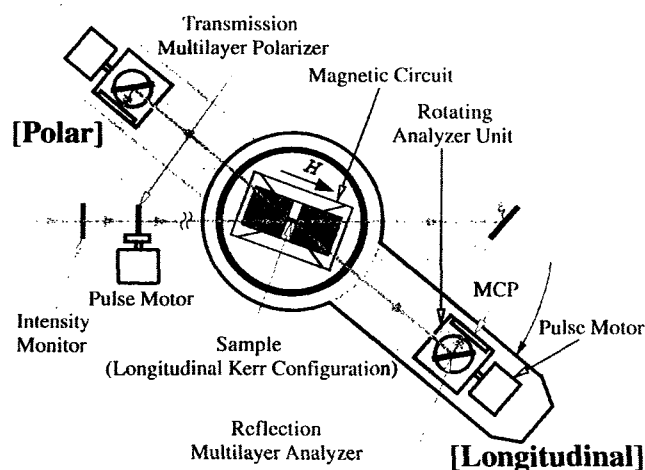


図1 軟X線磁気カー回転分光装置の概略図

本装置の作製により軟X線ファラデー回転測定に加え、これまでに測定例のない軟X線領域での磁気カー回転スペクトル測定およびその入射角依存測定を実施できる装置環境を整えた。

第5章 磁性単層膜の軟X線磁気旋光分光測定

第4章で述べた軟X線磁気カー回転測定装置とこれまでの軟X線ファラデー回転測定装置を用い、3d遷移金属単層膜を試料とした縦カー回転測定とファラデー回転測定の比較検証実験をM_{2,3}吸収端領域において行った。両磁気旋光測定の結果間に矛盾がないことを確認し、測定が正しく行われていることを示した。また、これまでに報告されているTEY-MCD測定結果との比較から、軟X線磁気旋光分光法は、表面の影響を受けやすい反射型測定でもTEY-MCD法に比べ表面酸化・汚染等の影響を受け難くより信頼性の高いバルクの情報を与えることを示した。

以上により、軟X線磁気光学の新しい手法として軟X線磁気旋光分光法を確立した。

第6章 Co/Pt 多層膜の軟X線ファラデー回転分光測定

確立した軟X線磁気旋光分光法を磁性多層膜研究へ応用した。選択した系はCo/Pt多層膜である。これまでに45～85eV領域での反射MCD法を用いたCoおよびPt磁化に関する研究が報告されている。しかしこの反射MCD測定から導出された誘電率テンソル非対角項実部の値はCoの $M_{2,3}$ 吸収端近傍においてCoのバルク値に対し異常に大きいものであり、その解析法を含め大きな疑問がある。本研究ではまずシミュレーション計算によりこの問題点を明確化した。すなわち、これまでの磁性多層膜の反射MCD測定において用いられてきた多層膜を均質バルクと見なす解析手法が不適切であり、またその際の測定配置である直入射配置だけでは誘電率を導出できず、磁化の情報を得るには入射角依存測定が不可欠であることを明らかにした。一方、透過法であるファラデー回転測定ではファラデー配置のみで多層膜の磁化について正しい情報が得られることをシミュレーションより示した。

Co/Pt多層膜の軟X線ファラデー回転分光測定は、Siウエハーに作製した薄膜部を基板として作製したCo層あるいはPt層厚の異なる5つの試料について行った。図2に50～80 eV領域におけるファラデー回転角スペクトルを示す。本測定結果より、これまでの反射MCD測定から導出された異常に大きいCoの誘電率テンソル非対角項実部に対し正しい値を提

示した。また、ファラデー回転角の層厚依存性よりCo層ならびにPt層における磁気モーメントの分布を評価し、Co磁化は層厚に依存せず層内でおおよそ一様に分布していること、Pt磁化は界面に近いほど大きな値を持つことを結論した。また、Co/Pt多層膜とCoPt₃合金間でのPtサイトにおける電子状態は類似していることを示唆した。さらに、これまでの磁気旋光分光測定ではなされてこなかったMCD総和則の適用を本研究において初めて行い、Co/Pt多層膜のCo 3d軌道磁気モーメントとして平均で約0.17 μ_B の値を得た。

以上により、磁性多層膜研究に対する軟X線ファラデー回転分光測定の有用性を実証した。

第7章 Co/Cu 多層膜の軟X線磁気カー回転分光測定

透過法の場合、基板物質は薄膜化可能なものに制限され、同時に試料合計厚さも制限を受ける。透過型試料の作製が困難である場合には、反射法を用いることが不可欠となる。そこで、反射型の軟X線磁気旋光分光法の磁性多層膜測定への応用例として、Co/Cu磁性多層膜の軟X線磁気カー回転測定をCoおよびCu $M_{2,3}$ 吸収端を含む領域で異なる二つの入射角で行った。図3および図4に、CoおよびCuの $M_{2,3}$ 吸収端近傍領域の磁気カー回転角スペクトルを示す。得られた磁気カー回転角スペクトルのCo $M_{2,3}$ 吸収端近傍領域について多層構造を考慮したモデル計算を行い、その結果が妥当であることを確認した。こ

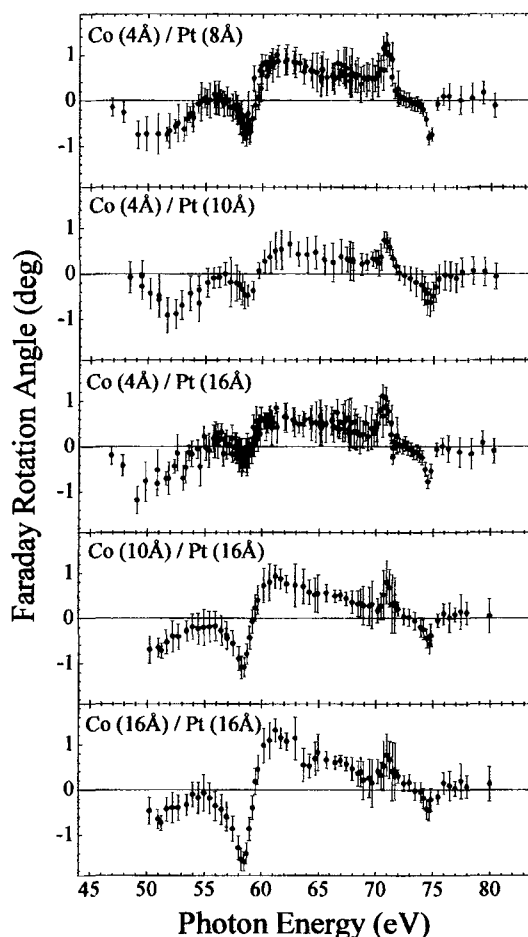


図2 Co/Pt 磁性多層膜のファラデー回転角スペクトル

のことににより、いくつかの入射角を選びモデル計算を行うことによって、実験的に誘電率を求めることができることを示した。また、微量であることが知られるCu 3*d*バンドの磁気分極をCu *M*_{2,3}吸収端近傍での明らかな回転角として検出し、十分感度良く測定出来ることを示した。

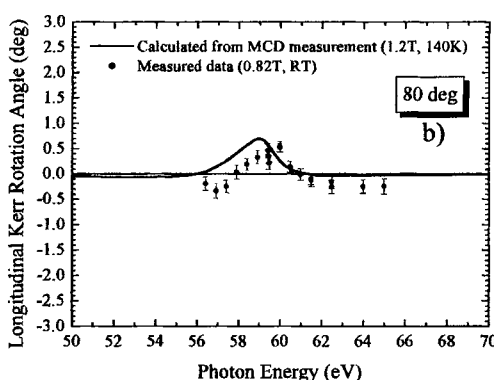
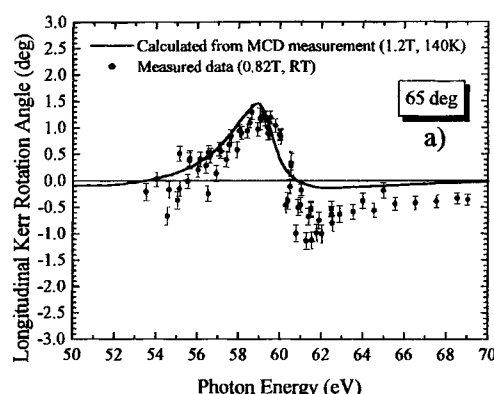


図3 Co/Cu 多層膜の縦カー回転角スペクトル
(Co *M*_{2,3} 吸収端近傍)

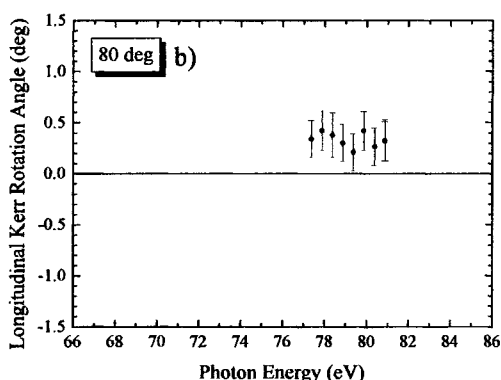
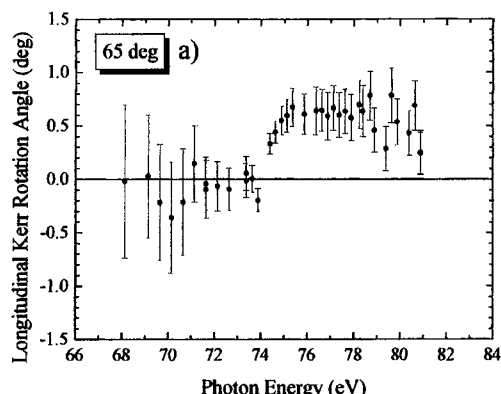


図4 Co/Cu 多層膜の縦カー回転角スペクトル
(Cu *M*_{2,3} 吸収端近傍)

第8章 結論

本研究ではまずこれまで不明確であった多層膜偏光子の設計指針を明らかにし、これに基づき性能の良い多層膜偏光子を開発した。次いで軟X線磁気旋光分光測定装置を作製し、これによりCoとNiの単層膜の磁化を評価し無矛盾性を確認して、軟X線磁気旋光分光法を磁気光学の新しい手法として確立した。そして、Co/Pt多層膜の軟X線ファラデー回転分光測定とCo/Cu多層膜の軟X線磁気カー回転分光測定を行い、シミュレーションやこれまでの報告データとの比較などから測定法の有用性を示した。すなわち本測定法が正しい方法論として元素個別の磁化に関する情報を引き出せることを実際に示し、磁性多層膜の研究に有用な手段であることを示した。

今後測定精度の向上を計ると、磁気モーメントの異方性検出や磁性多層膜におけるスペーサー層の弱い磁気モーメントの測定が可能になるものと期待される。また、回転角の試料温度や印加磁場に対する依存性などを測定すれば、得られる情報は非常に広がりと考えられる。軟X線磁気旋光分光法は、直線偏光のみが得られる多くの放射光ビームラインで容易に行える点からも有用性が高く、磁気分光の活発化に大きく寄与できる測定法である。

論文審査結果の要旨

軟 X 線領域での磁気分光は、内殻励起を利用して元素個別の磁化に関する情報を引き出すことができる有力な磁気測定法である。現在、円偏光放射光を利用した磁気円二色性 (MCD) 測定が行われているが、円偏光度が実測されていない場合が多いなどいくつかの問題がある。一方磁気旋光測定がある。この測定は光の偏光状態を明確にして行うものであり、より正確な情報が取得できるものとして期待されるが、偏光子の設計法を含めまだ確立された段階にはなく、研究例は非常に少ない。そこで本論文提出者は軟 X 線磁気旋光分光法を磁気測定法として確立して、これを磁性多層膜の研究に応用し有用性を示した。本論文はこの研究成果をまとめたもので、全文 8 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。第 2 章は磁気光学の理論をまとめている。第 3 章では磁気旋光法に必須である高い直線偏光能をもつ偏光子が、吸収の少ない物質対による多層膜を利用することによって得られることを初めて明確にし、これに基づき 50~90eV 領域で高性能のものを作製したことを述べている。第 4 章ではこれら偏光子を用いて製作した透過型のファラデー回転と反射型の磁気カー回転が測定可能な軟 X 線磁気旋光分光装置を紹介している。特に後者は透過型試料が作製できない場合に有効である。第 5 章ではこの装置を用い上記 2 種の磁気旋光測定を Co および Ni 単層膜の $M_{2,3}$ 吸収端領域において行い、磁気旋光分光法が表面の影響を受けやすい反射型測定でも、表面酸化・汚染等の影響を受け難くバルクの情報を与えることを示している。第 6 章では Co/Pt 磁性多層膜のファラデー回転分光を Co $M_{2,3}$ および Pt $N_{6,7}$ 吸収端近傍で行い、これまでの反射 MCD 測定の値に比べて正しい Co の誘電率テンソルの値を得たこと、Co 磁化は Co 層内で一様に分布しているのに対し Pt 磁化は界面に局在していること、Co の軌道磁気モーメントを見積ることができたことなどを述べている。第 7 章ではさらに Co/Cu 磁性多層膜の磁気カー回転分光測定を Co および Cu $M_{2,3}$ 吸収端近傍で行い、単体では非磁性である Cu の磁化を観測し、この測定法が微量を十分感度良く測定出来ることを示している。第 8 章は結論であり総括と今後の課題と展望を述べている。

以上、本論文は磁気測定法の新しい手法として軟 X 線磁気旋光分光法を確立し、この方法が磁性多層膜の研究に有用な手段であることを示しており、軟 X 線分光学、磁性体物理学、さらには応用物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。